

선로부 TES를 갖는 지하철 역사내 화재의 수치 해석

박종택,¹ 원찬식,² 허남건^{*2}

A NUMERICAL STUDY ON THE FIRE EMERGENCY IN THE UNDERGROUND STATION WITH TRACKWAY EXHAUST SYSTEM (TES)

Jong-Tack Park,¹ Chan-Shik Won² and Nahmkeon Hur^{*2}

In the present study, a numerical simulation of the subway carriage fire is performed to determine the more effective operation of Trackway Exhaust System(TES) in underground stations. The four types of possible TES operation (OSUS, OSUE, OEUS and OEUE) is simulated and compared their removal capability of smoke and hot temperature for the carriage fire of 2MW. From the results, the distribution of temperature and smoke concentration is more dependent on the operation of fans located at upper side of the platform than those at lower side. It is also found from the results that for more efficient smoke control, the fans at upper side of the platform should be operated as an exhaust system. Whereas the fans at lower side can be operated as a supply system to aid upper exhaust fans.

Key Words : 화재해석(Fire Simulation), 환기장치(Ventilation System), 연기농도(Smoke Concentration), 팬용량(Fan capacity), 이동격자(Moving Mesh)

1. 서 론

대구 지하철 화재 사건(Fig. 1)과 같은 지하 공간에서의 화재는 많은 인명을 앗아가는 대형사고로 이어지는 경우가 대부분이다. 그러므로 승객과 승무원들을 대상으로 하는 안전 교육 및 예방책, 대피훈련 등 다각적인 방법들이 제시되고 있으며 이런 화재시 행동 요령은 인명 피해를 줄일 수 있는 중요한 요소이다. 그렇지만 예상할 수 없는 극한 상황일 경우 이러한 행동 요령은 기대하기 힘들기 때문에 보다 개선된 방재 대책이 필요하다. 즉, 지하철 역사내의 방재를 위한 시설물이나 시스템의 적절한 운전은 인명피해를 보다 줄일 수 있게 된다.

비록 작은 화재일 경우라도 지하철 화재시 발생하는 열과 연기는 밀폐된 지하공간의 특성상 승객의 안전을 위협하는 가장 큰 요인이 된다. 이것을 막기 위한 여러 가지 방법들이 제시되고 있는데 그중 하나로 평시의 환기 시스템을 이용하



(a) burned platform and train (b) inside the burned train

Fig. 1 Subway fire of Daegu, Korea[1]

는 것이다. 열차 운행시 선로부에서 발생하는 열을 제거하기 위하여 터널과 지상을 연결하는 환기장치를 이용하는데 이것을 열차 및 지하철 역사 공간에서 발생하는 화재와 같은 응급 상황시 발생한 열과 연기의 제연을 목적으로 전환되는 시스템을 말한다[2]. 지하철 역사와 같은 밀폐된 공간에서의 화재는 초기 단계에서의 진화와 환기 시스템의 제연 효율성이 피해를 최소로 줄일 수 있는 관건이 된다. 이때, 제연 효율성은 급·배기 장치의 설치 방식과 가동 방식에 따라서 좌우될 수 있다. 역사의 선로부 상부와 하부에 급·배기 팬을 설치하여 선로부에서 화재로 인해 발생하는 열과 연기를 배출해 주

접수일: 2005년 12월 13일, 심사완료일: 2006년 11월 22일.

1 서강대학교 기계공학과 대학원

2 서강대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

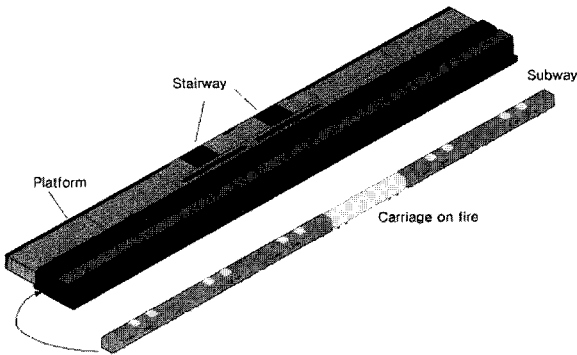


Fig. 2 Computational domain

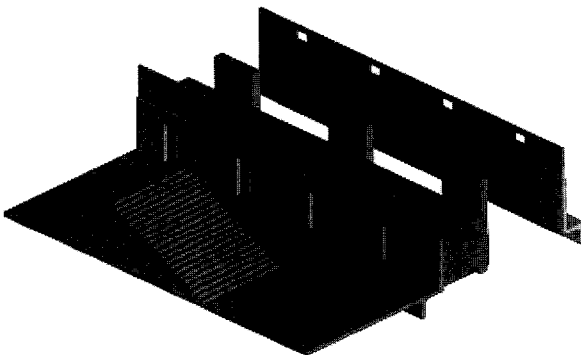


Fig. 3 Detailed mesh showing train and platform

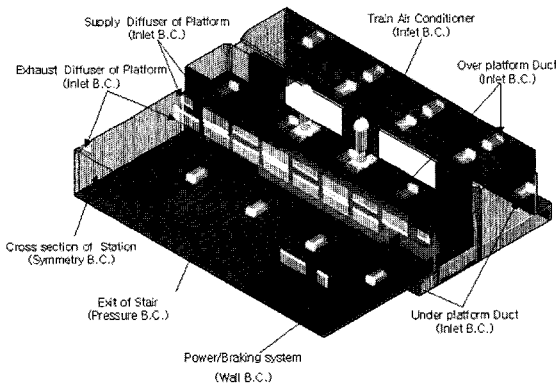


Fig. 4 Boundary conditions applied in computation

로부에 설치된 급·배기 장치의 가동 방법에 따른 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 역사 전체를 모델링하여 승강장 및 선로부위 온도 분포 및 기류 분포, 연기 농도 분포를 비교하였으며 이에 따라 화재 발생시 방재 대책에 대한 기본적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 수치 해석

2.1 해석 대상

본 해석에서는 서울 지하철 9호선 1구간 918정거장의 설계 자료로부터 역사를 3차원 모델링 하였으며, 열차 총 6량중 4량째의 열차 1량이 전소하는 하는 경우를 설정하였다. 화재의 크기는 대체로 1량이 전소하는 경우에는 20MW[3], 열차 내부에 화재가 난 경우 7MW[4]의 열을 발생시키는데, 본 연구에서는 열차 1량이 전소하는 20MW의 경우로 가정하여 화재해석을 수행하였다. 화재가 발생하는 경우 고열로 인해 창문은 모두 깨지게 되므로 화재 발생시 화재 발생 객차의 출입문과 창문은 모두 열려있는 상태로 가정하여 해석하였고, 화재가 발생하지 않은 열차는 문만 열어 놓은 상태로 설정하였다. 그리고 화재에 따른 승강장 및 선로부의 온도와 기류의 특성만을 알고자 열차 내부의 에어컨의 실외기 및 동력부, 제동부에서의 열의 방출은 무시하였다. 해석영역은 지하철 역사와 열차 길이를 고려하여 폭18.35m, 길이 120m, 높이 5.48m이며, 사용된 계산 격자의 수는 약 2,000,000개이고, 이중 유체 셀은 약 1,600,000개, 고체 셀은 약 400,000개이다. 경계조건은 선로부의 열차가 정차된 양 끝쪽에 압력 경계 조건을 설정하였으며, 모든 환에 해당하는 격자는 입구 경계 조건을 주었다. 이때 환의 가동 방식에 따라 상부와 하부의 환은 평시의 환기 방식의 역회전으로 가정하였다. 전체 해석 격자는 Fig. 2에 나

Table 1 Cases of fire simulation with various ventilation types

Case	Ventilation Types	Capacity (CMM)	
		Upper Fan	Lower Fan
1	Overplatform Supply	1,900	1,520
2	Underplatform Supply	1,520	1,900
3	OSUS	1,900	1,520
4	Overplatform Supply	1,900	1,520
5	Underplatform Exhaust	1,520	1,900
6	OSUE	1,900	1,520
7	Overplatform Exhaust	1,900	1,520
8	Underplatform Supply	1,520	1,900
9	OEUS	1,900	1,520
10	Overplatform Exhaust	1,900	1,520
11	Underplatform Exhaust	1,520	1,900
12	OEUE	1,900	1,520

며, 또한 승강장 내부에 디퓨저를 설치하여 승강장 내부로의 열출입을 차단하고 승강장 내부 온도를 낮춰주게 된다. 승강장내 디퓨저의 설치방식 또한 승강장 내부의 온도와 기류에 영향을 미치게 된다. 따라서 적절한 급·배기 환의 용량과 설치방식에 따라 공조부하를 줄일 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 현재 신설중인 서울 지하철 9호선을 모델링하여 선

타내었으며, 역사내 정착되어 있는 1량의 열차를 Fig. 3에 제시하였다. 그리고 Fig. 4는 경계조건을 나타내었다. 선로부의 급·배기 환의 용량은 1,900CMM과 1,520CMM을 설정하여 상부와 하부에 각 경우에 따라 달리 설치하여 총 12가지 방식으로 해석하였으며 이를 Table 1에 정리하여 나타내었다. 승강장의 디퓨저는 폭이 2m, 너비가 약 0.04m인 유량이 770CMH인 급기 디퓨저를 사용하여 에어 커튼(Air curtain)을 형성하는 경우에 대해서 해석을 실시하였으며, 화재시 승강장 배기는 없는 경우를 고려하였다.

2.2 해석 방법

본 해석에는 영국 Imperial College의 Gosman 교수의 그룹에 의해 개발되어 상용되고 있는 STAR-CD를 이용하여 3차원 압축성 난류 유동 수치해석을 수행하였다. 그리고 화재 발생 후 60초간의 화재 초기 단계에서의 승강장 및 선로부의 시간변동에 따른 비정상상태에 대한 해석을 수행하였다. 화재로 인한 열과 연기를 묘사하기 위하여 전체 6량 중 화재차량 격자에 열유속을 부여하였으며, 더불어 연기를 묘사하기 위하여 무차원화 된 스칼라 값을 지정하여 수치 해석시 농도로써 표현하였다. 화재 차량에서 발생하는 연기의 농도값을 1이라 가정하여 해석시 이에 상대적인 값으로서 나타남으로 정의하였다.

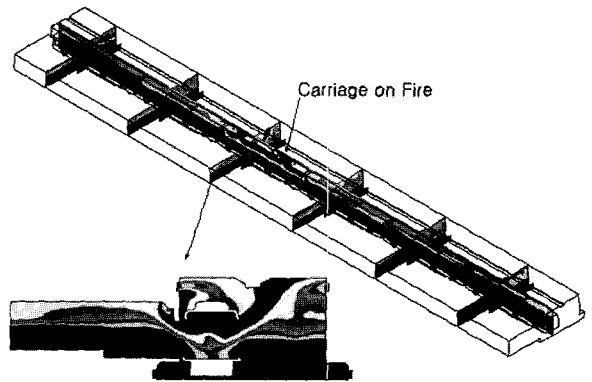
3. 결 과

본 연구의 지하철 화재 해석은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 환기 시스템의 가동 방식에 따른 승강장 및 선로부의 온도 및 농도분포를 상호 비교함으로써 화재로 인한 열 및 연기 제거의 가장 효율적인 방식을 제시하고자 한다.

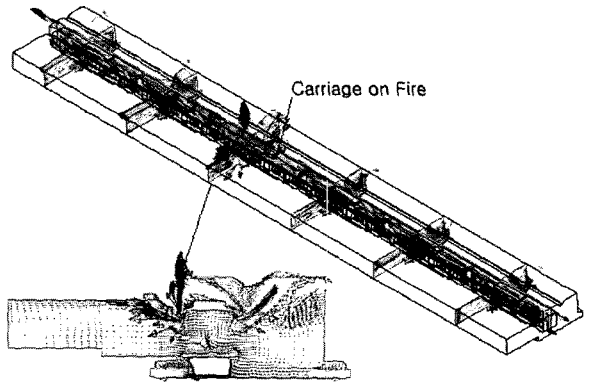
3.1 환의 가동 방식에 따른 화재 해석 결과

상부급기, 하부급기 방식 (OSUS)

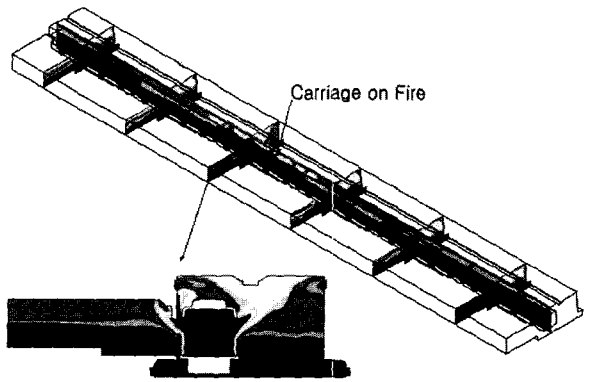
Fig. 5에 나타난 결과들은 화재 발생시 상, 하부에서 동시에 급기하는 경우 비정상상태 해석 결과 중 화재 열차 도착 후 35초 후 역사내의 온도, 속도 그리고 농도 분포를 나타낸 그림이다. 이 경우 전체 승강장 하부의 온도분포는 100℃ 이하의 온도 분포를 보인다. 이는 승강장 디퓨저에서 급기되는 공기가 화재 차량으로부터 유입되는 고온의 공기를 적절히 차단시켜주기 때문으로 생각되며 아울러 상부에서 급기되는 공기에 의해 상당부분 스크린 도어와 열차사이 윗부분으로 열이 제거되기 때문이다. 그러나 화재 차량 주위의 승강장 위쪽으로 고온의 공기가 분포하므로 이를 제거하기 위한 효과적인 장치를 설치하는 것도 화재시 안전한 환경을 조성하기 위한 방법이 될 것이다. 또한 화재 차량에서 발생된 고온의 공기는 하부 배기 장치의 역회전에 의한 공기 유입으로 인해



(a) Temperature distribution

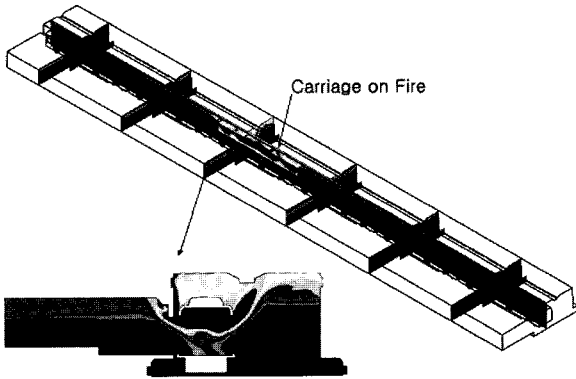


(b) Velocity distribution

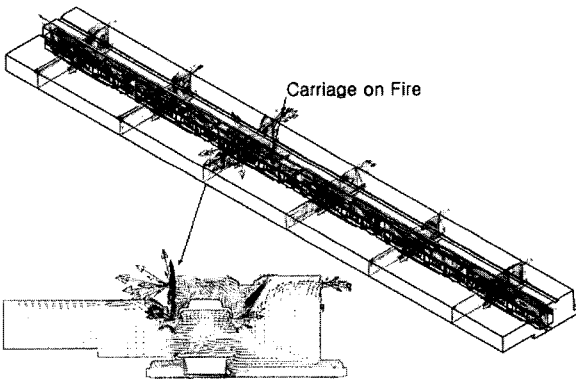


(c) Smoke concentration distribution

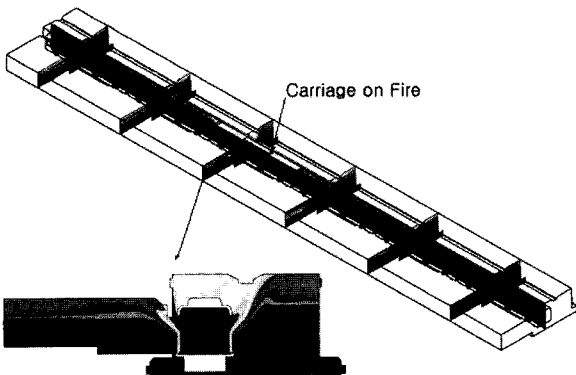
Fig. 5 Computational results at 35sec after fire occurrence for Overplatform Supply / Underplatform Supply ventilation (OSUS)



(a) Temperature distribution



(b) Velocity distribution



(c) Smoke concentration distribution

대체로 열차가 정차해 있는 반대편 선로부 상단으로 확산되어 분포한다. 연기의 농도는 온도 분포와 유사한 경향성을 지니며 확산되며 역시 승강장 하부에서의 농도는 상대적으로 낮은 값이 유지되고 있음을 알 수 있다.

상부급기, 하부배기 방식 (OSUE)

이 경우 화재 발생시 전체적인 온도 및 연기의 농도 분포는 상부 급기, 하부 급기하는 경우와 비슷하게 승강장에서는 대체로 안정적인 분포를 보인다. 이 경우에도 승강장에서 급기되는 공기와 상부에서 급기되는 공기에 의해 뜨거운 공기는 승강장 부근보다는 선로부 쪽으로 편중된 분포를 보이고 있으나, 하부에서 배기가 이루어지는 효과로 인하여 열차가 정차해 있는 반대편 선로부 상단보다는 중앙에서 높은 온도 분포를 가진다. 연기의 농도에 있어서도 이러한 경향성은 동일하다.

상부배기, 하부급기 방식 (OEUS)

Fig. 6에 나타낸 결과들은 화재 발생시 상부 배기, 하부급기하는 경우 비정상상태 해석 결과 중 화재 열차 도착 후 35초 후 역사내의 온도, 속도 그리고 농도 분포를 나타낸 그림이다. 이 경우 고온의 공기가 자연적으로 상승되는 효과와 동시에 상부에서의 배기로 인해 승강장 및 선로부로 확산되지 않고 배출됨을 볼 수 있다. 또한 하부에서의 급기로 인해 고온의 공기를 하부로 하강되는 것을 억제되는 것을 보여준다. 이로써 승강장으로 유입되는 열이 차단됨에 따라 온도분포는 전체적으로 낮게 된다. 연기의 농도에 있어서도 온도 분포와 같은 경향성을 갖게 되어 승강장으로 유입되는 연기 또한 적다.

상부배기, 하부배기 방식 (OEUE)

이 경우의 해석 결과 온도분포는 상, 하부의 배기로 인해 선로부의 열차가 정차된 반대편쪽은 상부와 하부에서 전체적으로 100℃이하의 낮은 온도를 갖는 반면 해석 영역인 열차가 정차되어 있는 쪽의 승강장에서의 온도 분포는 상부배기, 하부급기의 경우보다 비교적 많은 열의 유입으로 인하여 높은 온도가 분포한다. 이는 열차의 정차로 인하여 상, 하부의 환에서 배기가 이루어짐에도 불구하고 모멘텀의 방해가 됨으로서 충분한 배기가 어려워지고 승강장으로 유입되는 것으로 생각되어진다. 연기의 농도에 있어서도 이러한 경향성은 동일하다.

3.2 환 가동 방식별 역사 환경 비교

위 4가지 방식의 경우 온도와 연기의 농도 분포는 상부 방식에 따라 비교적 유사한 경향성을 갖는다. 즉 온도와 농도의

Fig. 6 Computational results at 35sec after fire occurrence for Overplatform Exhaust / Underplatform Supply ventilation (OEUS)

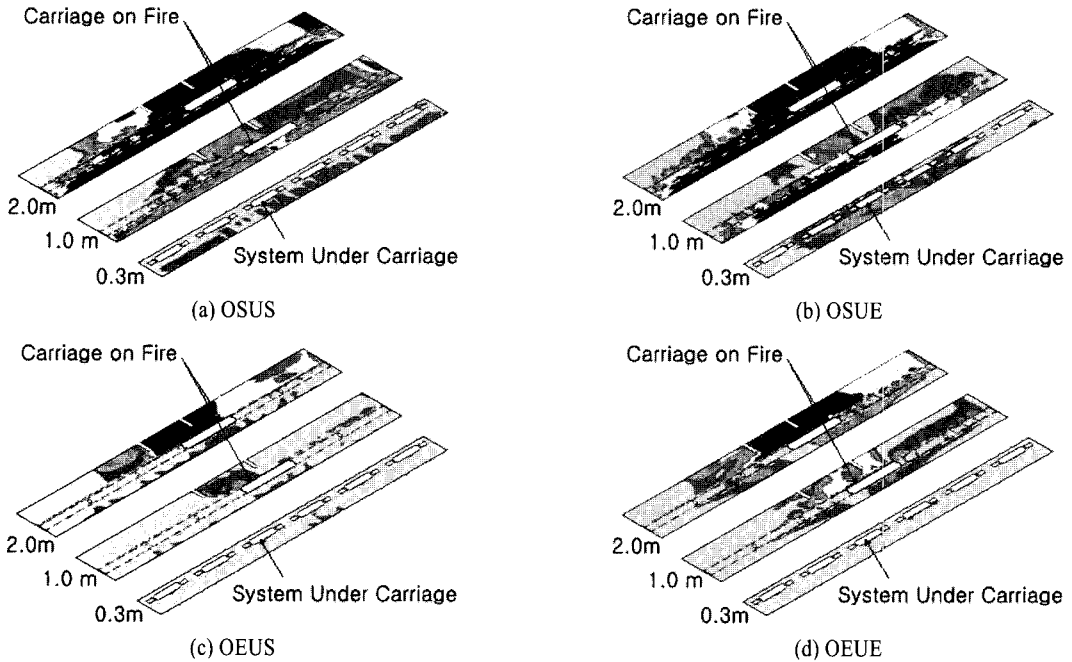


Fig. 7 Temperature distribution at various horizontal sections at 35 sec after fire occurrence

경향성은 상부의 가동 방식이 급기, 배기인지에 따라 결정되어진다. Fig. 7은 열차의 화재가 발생된 35초 후에 4가지 방식의 전체 해석 영역의 높이에 따른 온도 분포를 보여준다. 그림에서 통해서 알 수 있듯이 모든 방식에서 승강장의 상부의 온도가 하부의 온도보다 매우 높은 분포를 보이고 있다. 또한 상부에서 급기가 이루어지는 두 방식은 상부에서 배기가 이루어지는 방식에 비하여 승강장 전체의 영역에서 높은 온도 분포를 갖는다. 이는 화재로 인해 자연 대류된 높은 온도의 공기가 상부에서의 급기로 인해 제거되지 않고 선로와 승강장을 따라 양방향으로 확산된다. 반면에 상부에서 배기가 이루어지는 두 방식에서는 고온의 공기가 제거됨으로서 비교적 낮은 온도 분포를 갖게 된다. 하지만 상부에서의 같은 방식일 지라도 하부에서의 서로 다른 방식은 국부적으로 다른 유동 양상을 보이며 온도 및 연기의 농도분포의 차이를 나타낸다. 즉, 상부에서 급기해주는 두 방식인 Fig. 7의 (a)상부급기/하부급기인 경우와 (b)상부급기/하부배기를 비교하면 승강장에서 2m높이인 경우 유사한 온도 분포를 갖지만, 승강장으로부터 1m높이일 때의 결과는 확연한 차이가 있다.

상부와 하부에서 동시에 급기해 주는 경우 대부분의 고온 공기가 본선 터널쪽으로 빠져나가 상부를 제외한 영역에서 전체적으로 낮은 온도 분포를 갖지만 하부에서 배기하는 방식은 선로의 아래쪽에서는 본선 터널에서 차가운 공기가 많이 유입되어 선로부 열차 하부에서 상·하부에서 급기하는

방식보다 낮은 온도분포를 보이지만 승강장으로부터 1m 높이인 지점에서는 배기 방식에 따른 유동 양상 때문에 지역적으로 높은 온도가 존재한다.

Fig. 8과 Fig. 9은 상부 급기/하부 급기(OSUS)인 방식과 상부배기/하부 급기(OEUS)인 방식에 대한 선로로부터 1.0m, 2.0m, 3.0m 떨어진 승강장에서의 화재 발생 35초후와 60초가 지난 후의 온도 분포를 나타낸 그래프이다. 이때의 승강장의 높이는 1.0m를 기준으로 하였다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 화재 열차로부터 발생된 뜨거운 공기는 승강장 위쪽으로 상승하였다가 자연 대류 현상에 의하여 승강장 양끝방향으로 이동하게 되고, 상대적으로 화재 차량에 가까운 마지막 차량 부근 승강장 위치에서 높은 온도의 공기가 존재하게 됨을 알 수 있다. 또한 상부에서의 배기방식이 급기 방식인 경우보다 모든 영역에서 낮은 온도 분포를 갖는다. 따라서, 화재가 발생하는 경우 상부의 환 가동 방식은 배기를 하부에서는 급기를 해 주는 것이 배열 및 배열에 효과적이라고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 TES(Trackway Exhaust System)가 설치된 서울 지하철 9호선 1구간 역사 승강장 선로부 화재 배연 수치해석을 수행하였다. 해석 결과 승강장 선로부의 급·배기 방식을 달리함

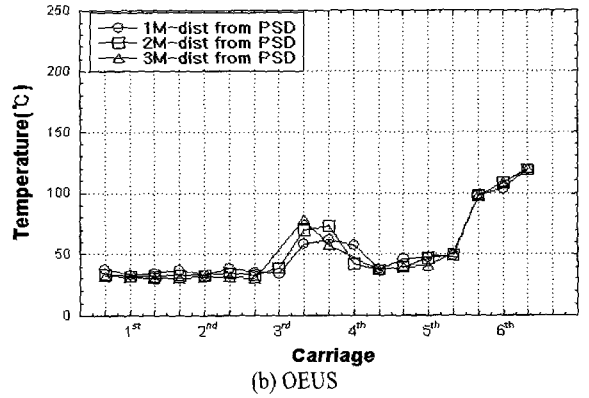
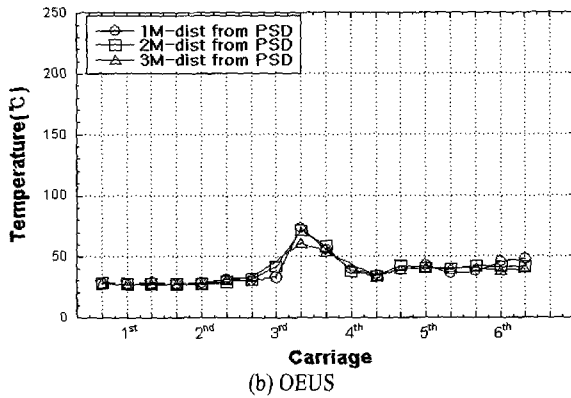
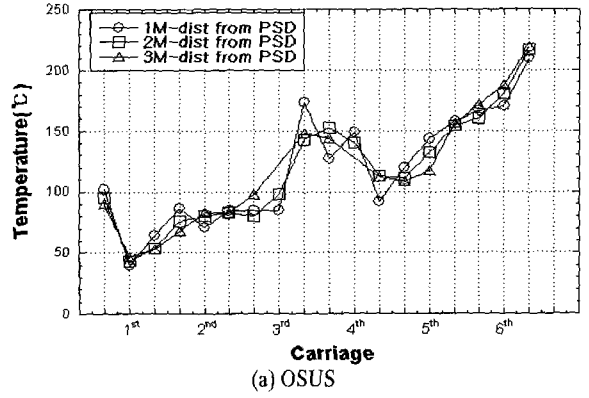
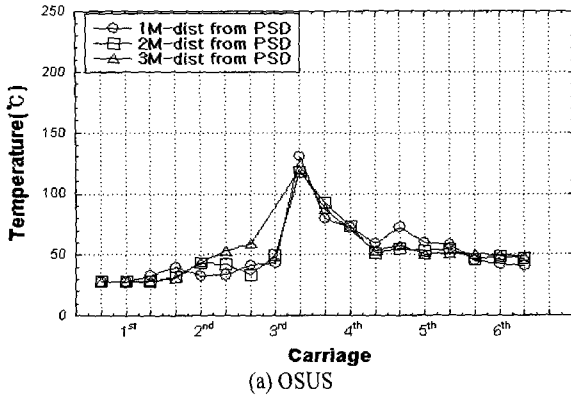


Fig. 8 Temperature distribution along platform at 35sec after fire occurrence

Fig. 9 Temperature distribution along platform at 60sec after fire occurrence

으로써 승강장과 선로부의 온도 분포와 연기의 농도 분포에 차이를 보여 주었다. 특히 하부의 환기 방식보다는 상부에서의 환기 방식이 보다 지배적으로 온도와 농도 분포를 결정하게 된다. 즉 상부의 환기 방식은 반드시 배기이어야 화재 발생시 배연 및 열 제거에 효율적이다. 또한 하부에서는 배기보다는 급기하는 방식이 승강장에 더 안전한 온도 및 농도 분포를 나타내었다.

지금까지의 연구 결과는 아직 그 적용범위가 정차 열차에 국한되어 있지만 향후 실제 상황을 고려한 연구를 위한 선행 연구로서 충분한 자료를 제공 할 수 있을 것이며 아울러 이를 기반으로 응급 상황시 배연 및 화재 방재에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] www.daegusubway.or.kr.
 [2] 허남건, 2001, "서울지하철 9호선 1구간 건설공사 승강장 선로부 TES 환기 Simulation 및 화재 배연 Simulation 보

고서," 주식회사 화승.

[3] *Subway Environmental Design Handbook*, 1976, Transit Development Corporation INC, 2nd Edition.
 [4] Mendona, F.G., 1995, "Investigation into the Interaction of a Carriage Fire and Station Ventilation System in a Bored Tunnel Station," Computational Dynamics Ltd.
 [5] Lunity. A., Yau, R. and Tang, D., 2000, "CFD simulation of underground station fire a Hong Kong Example," *Tunnel and Underground Station Fires*, pp.45-54.
 [6] Miclea, P.C. and McKinney, D.M., 2000, "CFD simulation of vehicle fire in a station equipped with platform screen doors," *10th International symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp.305-322.
 [7] Maevski, I.Y. and Fay, J.F., 2000, "Simulation and ventilation system design for the Tren Urbano Subway Project in Puerto Rico," *10th International symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp.465-483.